ChinaXiv合作期刊

第 46 卷 第 8 期
2023 年 8 月

核 技 术 NUCLEAR TECHNIQUES
www.hjs.sinap.ac.cn

Vol.46，No.8
August 2023

低能核反应及相关核结构研究进展

杨 磊 林承键 贾会明 马南茹 温培威 杨 峰 张焕乔

（中国原子能科学研究院 北京 102413）

摘要 中国原子能科学研究院核反应团队依托国内外的大科学装置，在重离子熔合-裂变机制、垒下熔合增强机制、奇特核反应机制、奇异结构和奇异衰变方面取得了多项原创性成果。本文对其中的代表性成果进行了简要回顾。主要包括：（1）系统调查了正 Q 值中子转移的耦合道效应，并提出了自洽的方法评估转移耦合的贡献，发现了异常的同位素效应；（2）提出了用高精度背角准弹散射方法抽取原子核的形变参数，确证了原子核存在十六极形变；（3）提出了用轻带电粒子的替代俘获反应方法，基于此方法给出了关键的 ^{239}Pu（n，2n）反应截面；（4）系统考察了 sd 壳丰质子核奇异衰变谱学，发现了 ^{22}Si 的 β 缓发双质子衰变模式，并发现镜像核 ^{22}Si/^{22}O 的 β 衰变中存在极大的同位旋不对称性，同时在 ^{26}Si 中发现了迄今为止最强的同位旋混合态；（5）系统研究了奇特核体系在近垒能区的反应机制，首次给出了实验证据表明经典色散关系不适用于中子晕核 ^{6}He+^{209}Bi 体系，并对质子滴线核 ^{8}B 和 ^{17}F 的反应机制进行了细致考察。本文也对将来基于重离子飞行时间谱仪和北京放射性束流线可能开展的工作进行了展望。

关键词 重离子核反应，近垒能区，奇异核结构

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.080006

Progress on nuclear reactions and related nuclear structure at low energies

YANG Lei LIN Chengjian JIA Huiming MA Nanru WEN Peiwei
YANG Feng ZHANG Huanqiao

(*China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China*)

Abstract Through the use of the accelerator facilities at home and abroad, the nuclear reaction group of the China Institute of Atomic Energy has made many remarkable achievements in the study of fusion-fission dynamics, fusion-enhancement mechanisms at sub-barrier energies, reaction dynamics induced by exotic nuclei, and the related exotic nuclear structure and proton decay. In this study, some representative achievements are reviewed briefly. (1) The fusion mechanisms at near-barrier energies were investigated systematically, and a self-consistent method to evaluate the coupled-channel effects was proposed. (2) Nuclear deformation parameters were extracted from backward quasi-elastic scattering, which offered evidence for hexadecapole shapes. (3) A surrogate capture method was developed, based on which the first ^{239}Pu(n, 2n) excitation function developed in China was derived. (4) Systematic studies of exotic decay spectroscopies for proton-rich nuclei in the sd-shell were performed, following which a β2p decay of

国家重点研发计划项目(No. 2022YFA1602302)、国家自然科学基金(No. U2167204, No. 12175314, No. 12235020)、中核集团领创项目(No. LC202309000201)

第一作者：杨磊，男，1985 年出生，2014 年于中国原子能科学研究院获博士学位，主要从事近垒能区奇特核相互作用性质和反应机制的实验研究

通信作者：杨磊，E-mail：yang_lei@ciae.ac.cn；林承键，E-mail：cjlin@ciae.ac.cn

收稿日期：2023-06-06，修回日期：2023-07-21

Supported by National Key R&D Program of China (No. 2022YFA1602302), National Natural Science Foundation of China (No. U2167204, No.12175314, No.12235020), the Leading Innovation Project (No.LC202309000201)

First author: YANG Lei, male, born in 1985, graduated from China Institute of Atomic Energy with a doctoral degree in 2014, focusing on interaction properties and reaction mechanisms of exotic nuclei at energies close to the Coulomb barrier

Corresponding author: YANG Lei, E-mail: yang_lei@ciae.ac.cn; LIN Chengjian, E-mail: cjlin@ciae.ac.cn

Received date: 2023-06-06, revised date: 2023-07-21

chinaXiv:202309.00041v1

ChinaXiv合作期刊

^{22}Si and a large isospin-asymmetry decay were discovered, and a strongly isospin-mixed doublet in ^{26}Si was revealed. (5) Systematic studies of reaction mechanisms induced by exotic nuclei at energies close to the Coulomb barrier were performed, providing evidence for the failure of the dispersion relation in the optical potential of ^{6}He+^{209}Bi, and the reaction dynamics of proton drip-line nuclei of ^{8}B and ^{17}F were investigated. Future research based on the new HiTOF and BRIF facilities is discussed as well.

Key words Nuclear reactions induced by heavy ions, Energies close to the Coulomb barrier, Exotic nuclear structure

chinaXiv:202309.00041v1

中国原子能科学研究院（以下简称原子能院）核反应团队形成于1988年串列加速器核物理国家实验室成立之初。团队早期主要依托串列加速器开展近垒及垒下能区重离子熔合裂变机制的研究，在熔合-裂变机制、势垒分布等方向取得了多项创新性成果，奠定了团队在低能重离子核反应领域的国际学术地位。2000年左右，随着放射性核束的兴起，团队在继续深入重离子熔合裂变机制研究的同时，也拓展了奇特核反应机制及其核结构相关的研究方向，包括弱束缚核反应机制、晕核结构以及高激发态质子发射机制等，并取得了丰硕成果。本文将从重离子核反应机制、奇特核结构与奇异衰变和弱束缚核反应机制三个方面简要回顾原子能院核反应团队近40年来的代表性研究成果，并对将来的发展方向进行展望。

1 重离子核反应机制研究

1.1 熔合-裂变机制研究

重离子反应生成的复合核或复合核系统处于高激发、高角动量的状态，其裂变特征与自发裂变或轻离子引起的裂变有很大不同。由于其反应途径非常复杂，重离子的熔合-裂变机制仍然是亟待解决的问题。

1986年，Vandenbosch等[1]发现，^{12}C+^{236}U和^{16}O+^{232}Th体系在近垒和垒下能区裂变碎片角分布的各向异性明显大于鞍点过渡态（Saddle-Point Transition-State，SPTS）模型的计算结果，即存在角分布各向异性异常现象。对于上述锕系靶核，其裂变势垒相对较低（5~6 MeV），除了全熔合过程导致的裂变反应外，非弹激发、核子转移等直接反应也会诱发靶核或者类靶核的裂变。由非弹激发引起的裂变不会产生角分布的各向异性异常；而转移反应引起的裂变，由于弹核带来的线性动量仅部分转移到靶核上，可能会导致类靶核裂变角分布的各向异性出现异常现象。因此，区分全熔合裂变和转移跟随裂变是理解此异常现象的关键。为了解决这一问题，核反应团队的张焕乔和刘祖华等[2]进一步发展了折叠角技术，很好地区分了不同的裂变成分。折叠角通常是指两个裂变碎片出射方向之间的夹角。对于全熔合裂变而言，弹核带来的线性动量和角动量全部转移到复合核中，即全动量转移。相比于部分动量转移的转移反应诱发裂变，全熔合裂变过程会表现出不同的折叠角分布。图1显示了^{16}O+^{232}Th体系在能量为78 MeV和86 MeV时不同角区（每10°一个角区）裂变碎片的折叠角分布，其中右侧主峰对应全动量转移的全熔合裂变事件，左侧小峰对应于转移跟随裂变成分。

利用折叠角技术以及双速度测量技术，可以很好地扣除非全熔合裂变事件。基于此，团队系统开展了^{11}B[3]、^{12}C[4]+^{237}Np、^{11}B[4]、^{16}O[2]+^{238}U和^{16}O[3,5]、^{19}F[2,6]+^{232}Th裂变碎片角分布的测量，进一步证实了在近垒和垒下能区全熔合裂变碎片角分布各向异性存在异常，引起了国际学术界的高度关注[7]。熔合-裂变是一个复杂的过程，各种非平衡裂变、非复合核过程以及核结构和初始状态等因素均可能导致碎片角分布各向异性的异常，到目前还没有一致的解释。1995年，刘祖华和张焕乔等[3]提出了低角动量相依的预平衡裂变模型：在近垒和垒下能区，入射道迁移到复合体系的轨道角动量较少，复合体系总自旋J较低，K（复合核体系总自旋在对称轴上的投影）分布的弛豫与J相关。这样，低角动量使得K自由度弛豫时间变长，未平衡而发生裂变，即K预平衡裂变。相比于标准的鞍点过渡态（Saddle-Point Transition-State，SPTS）模型，低角动量相依的预平衡裂变模型能够较好地描述实验观测到的裂变碎片角分布，是国际上两个著名模型之一（另一个是Hinde等[8]提出的形变相依的准裂变模型）。

另一方面，在重离子碰撞过程中，除了形成复合核继而裂变的全熔合裂变外，还存在快裂变和准裂变过程。准裂变是指质量自由度、K自由度等未平衡，此时复合核尚未形成。1983年，Back等[9]在^{16}O+^{238}U体系中发现明显存在裂变碎片角分布各向异性。这被认为是准裂变存在的信号。张焕乔等[10]在近垒能区测量了^{32,34}S+^{182,184}W体系熔合裂变激发函数，并利用角分布和质量分布等测量手段，首

ChinaXiv合作期刊

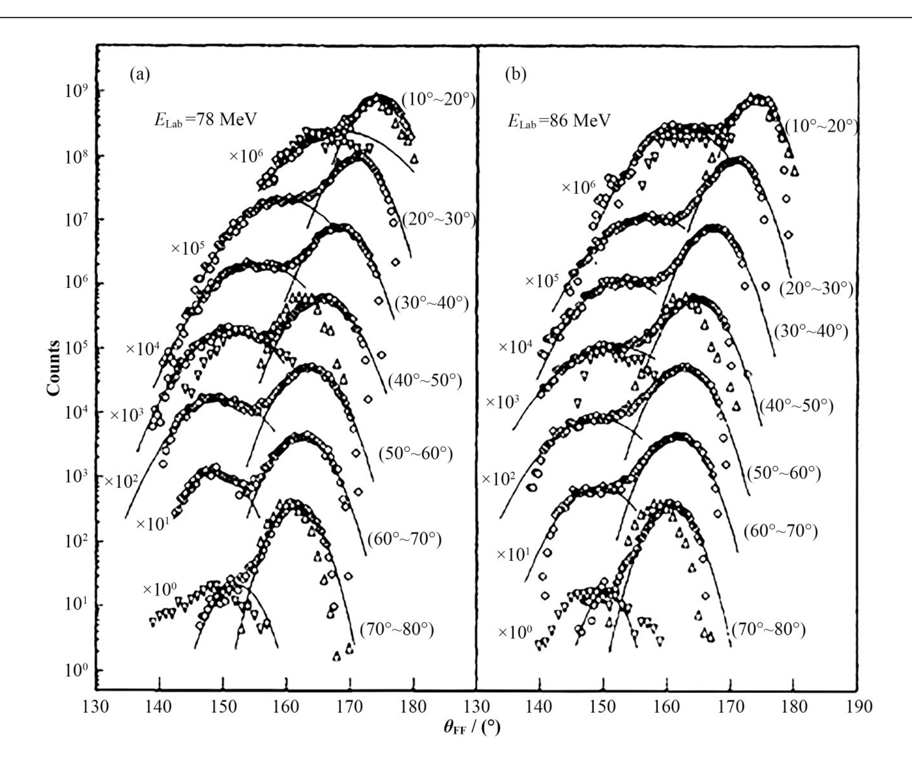


图1　$^{16}O+^{232}Th$体系在78 MeV (a)和86 MeV (b)能量下的裂变碎片折叠角分布[2]
实线为高斯拟合结果
Fig.1　Fragment folding angle distributions for $^{16}O+^{232}Th$ at 78 MeV (a) and 86 MeV (b)[2]
solid curves denote the Gaussian fitting results

次在中等体系中成功解析出了准裂变成分。该结果被认为是准裂变研究领域中的重要进展。

为了深入理解核的形变对裂变机制的影响，核反应团队的林承键等[11]在近垒能区开展了$^{48}Ti+^{144,154}Sm$、^{162}Dy、^{174}Yb、^{186}W、^{192}Os、^{196}Pt、^{200}Hg、^{208}Pb等体系的裂变碎片质量分布的系统学研究。不同靶核的裂变碎片质量分布的宽度(σ_M)随能量变化的情况如图2所示。可见，对于轻靶核或者球形靶核，σ_M随入射能量增加而增大，与熔合裂变的行为相符。但是，对于重靶核或者形变靶核，σ_M随入射能量的减小而迅速增大。该工作同时细致考察了可裂变性、核形变以及入射能量之间的复杂关系，为进一步理解准裂变动力学机制打下了基础。

1.2　熔合反应与耦合道效应研究

近垒核反应的一个显著特点是存在强烈的耦合道效应，导致垒下熔合截面呈数量级的增强。现有耦合道理论可以很好地描述由非弹激发引起的集体运动(振动或转动)的耦合，但不能合理描述转移道的耦合，特别是对于带有正Q值的中子转移道。

为此，团队开展了系统性的实验研究。利用静电偏转板系统测量了$^{16,18}O+^{50,52}Cr$、^{54}Fe、^{58}Ni、$^{74,76}Ge$[12]和$^{32}S+^{90,94,96}Zr$[13]、$^{112,116,120,124}Sn$、$^{144,154}Sm$等体系的熔合激发函数，抽取了势垒分布。其中，^{18}O体系的−2n道(“−”表示剥离)具有正Q值，与^{16}O体系形成鲜明对

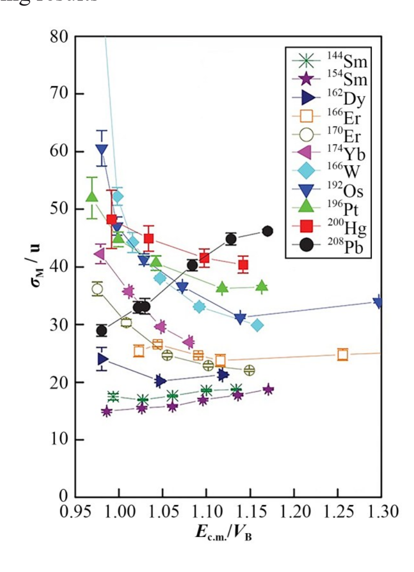


图2　^{48}Ti不同体系的裂变碎片质量分布宽度随能量变化情况[11]
Fig.2　Mass widths of the fission fragments of ^{48}Ti interacting with different targets at various energies[11]

比；而^{32}S与丰中子靶核的+xn道(“+”表示拾取，“x”表示转移中子的数目)具有正Q值，最多可达+6n道。结合完全耦合道模型分析，结果表明，^{18}O体系没有明显的与正Q值转移道相联系的熔合截面增强，而^{32}S体系呈现出强烈的与正Q值转移道相关的熔合截面增强，揭示了转移反应本身及其耦合的复杂性，如核子的迁移、重排和能量耗散以及核子之间

chinaXiv:202309.00041v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202309.00041v1

的关联等。为准确评估转移道耦合的贡献，团队提出了残余增强(Residual Enhancement，RE)的概念以扣除集体运动耦合的贡献，在耦合道模型计算中自洽地包含了核结构的信息，结果发现熔合增强与+xn的Q值相关，但在Zr体系中存在异常的同位素效应[14]，如图3所示。现有耦合道模型无法解释该现象，其深层的物理原因需要进一步探索。

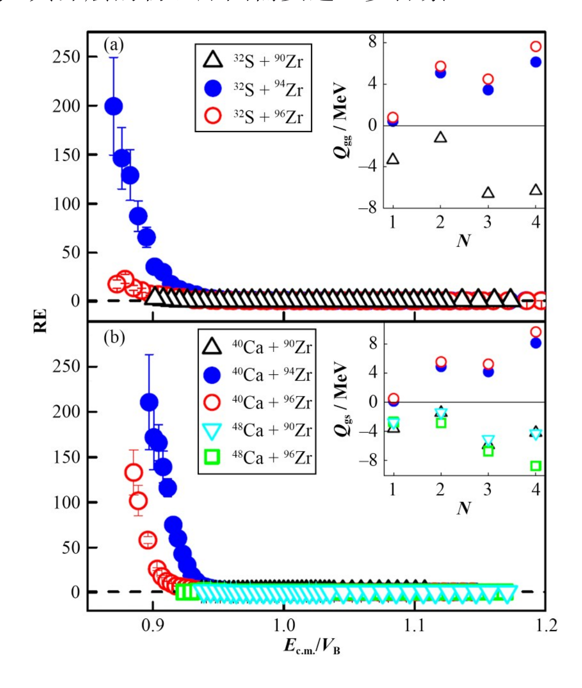


图3 S+Zr (a)和Ca+Zr (b)体系的熔合截面残余增强(Residual Enhancement, RE)随能量的变化[14]

Fig.3 RE as a function of $E_{c.m.}/V_B$ for S+Zr (a) and Ca+Zr (b) systems[14]

1.3 锕系核关键反应截面的提取

锕系核(n，2n)反应(中子增殖反应)截面是核能(快堆、钍基堆等)和国防领域重要的核数据，其中，^{239}Pu(n，2n)尤为关键，但我国长期缺乏自主的测量数据，只能使用国外公开的数据。测量的困难在于：1)直接测量2n受限于束流中子的强本底干扰；2)活化法测量需要极高的靶纯度，通常要求好于10^{-10}；3)在束γ测量需要完整的分支比信息，这受限于核结构信息。为满足国家重大需求，团队提出了用轻带电粒子(如p，d，^{3}He和α等)俘获代替中子俘获的替代反应法，开展了宽能区(n，2n)反应截面的测量。该方法能够克服传统替代反应面临的自旋修正的难题。

首先，用^{232}Th(α，2n)替代^{235}U(n，2n)开展了方法验证研究。这两个反应生成相同的复合核^{236}U，在激发能、自旋相同的情况下，它们的2n蒸发道截面是一样的。据此，测量了α+^{232}Th在18~36 MeV之间的裂变截面和2n蒸发余核^{234}U的α活度，获得了6~19 MeV之间14个能点的^{235}U(n，2n)反应截面，与直接测量结果以及评价库数据符合较好，验证了方法的可行性。在此基础上，开展了用^{236}U(α，2n)替代^{239}Pu(n，2n)的研究，获得了6~20 MeV之间15个能点的^{239}Pu(n，2n)反应截面[15]，如图4所示。这是我国首个具有自主知识产权的^{239}Pu(n，2n)激发函数的数据。所提出的替代俘获反应法为锕系核(n，2n)反应截面的测量开辟了一条新途径。

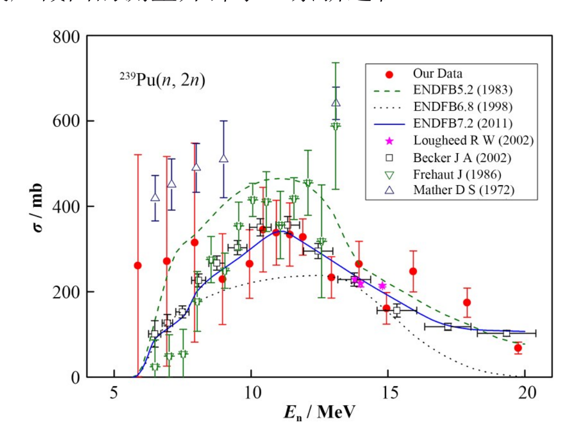


图4 替代俘获法得到的^{239}Pu(n, 2n)截面与其他数据的比较[15]

Fig.4 Comparison of the cross section of ^{239}Pu(n, 2n) deduced from the surrogate method with other data[15]

2 奇特核结构与奇异衰变

2.1 原子核高极次形变研究

原子核的形变是人们广泛感兴趣的话题之一。低极次的形变，如四极和八极形变参数(β_2和β_3)可以通过在束γ谱学的方法测定，但高极次的形变，如十六极形变参数(β_4)的精确测量是一个长期存在的难题。有鉴于此，团队提出了用低能背角准弹散射研究原子核形变的方法。在垒下能区，背角准弹角分布对耦合道效应非常敏感，特别是对形变参数。因此，通过拟合背角准弹角分布有可能抽取β_4。为了验证该方法的有效性，团队选取稀土区三个典型的形变核：^{152}Sm、^{170}Er和^{174}Yb作为靶核，高精度测量了^{16}O+^{152}Sm、^{170}Er、^{174}Yb体系从垒上到深垒下能区的背角准弹散射激发函数[16]。基于垒下数据用χ^2分析拟合势垒分布，抽取了三个靶核的高精度β_4值，如图5所示。可见，通过背角准弹角分布提取的β_4与其他实验方法(如库仑激发、库仑-核激发相干效应以及电子散射等)得到的结果符合较好，进一步提供了原子核存在十六极形变的直接实验证据。

2.2 激发态晕结构研究

当原子核远离β稳定线时，可能会出现物质密

ChinaXiv合作期刊

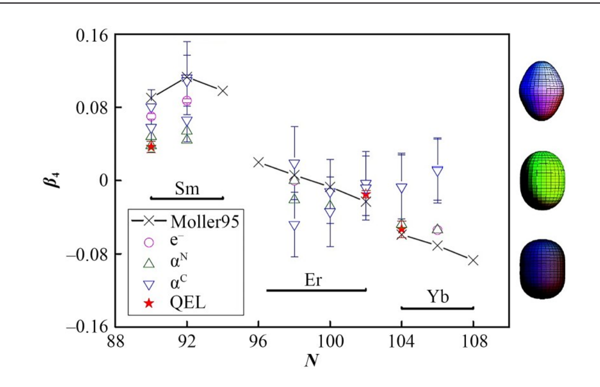


图5 从背角准弹角分布提取的十六极形变参数β_4与其他方法以及理论计算结果(Moller95)的比较[16]
右边从上至下分别为β_4=−0.1, 0和0.1以及β_2=0.3的形变示意图

Fig.5 β_4 extracted from quasi-elastic scattering at backward angles and compared with the results from other experimental approaches as well as the theoretical prediction (Moller95)[16]: three schematic forms corresponding to β_4 = −0.1, 0, and 0.1 with β_2 = 0.3 are illustrated

度非常松散的晕结构。晕核出现的区域、结构性质以及其参与反应的机制等是当前核物理领域的热点问题。目前所找到的晕核，大部分是滴线附近的原子核。那么在β稳定线上或者附近是否存在晕结构的核态？从形成晕结构的条件来看，答案是肯定的。Otsuka等[17]指出：晕现象具有普遍性。许多β稳定线上或者附近核的激发态可能存在着晕结构。

为了在β稳定线附近寻找新的晕核态，我们测量了^{11}B(d,p)和^{12}C(d,p)反应中出射道^{12}B和^{13}C的几个感兴趣核态的角分布[18]。根据前角的截面数据，分别用扭曲波玻恩近似(Distorted-Wave Born Approximation，DWBA)方法和渐进归一化系数(Asymptotic Normalization Coefficient，ANC)方法抽取了各核态外层中子的密度分布、均方根(Root Mean Square，RMS)半径以及外层核子的贡献等。由于ANC方法的模型近似无关性，其结果更加可信。得到^{13}C基态、第一和第三激发态ANC系数为(1.93±0.17) fm$^{-1/2}$、(1.84±0.16) fm$^{-1/2}$ 和 (0.15±0.01) fm$^{-1/2}$；RMS半径为(3.39±0.31) fm、(5.04±0.75) fm和(3.68±0.40) fm；相应的外层中子处于势阱外概率为14.3%、50.3%和25.2%。结果证实，^{13}C的第一激发态为晕核态，这是首次从实验上证实在β稳定线上存在激发的晕核态。同时得到^{12}B基态、第二和第三激发态ANC系数为(1.16±0.10) fm$^{-1/2}$、(1.34±0.12) fm$^{-1/2}$和(0.94±0.08) fm$^{-1/2}$；RMS半径为(3.16±0.32) fm、(4.01±0.61) fm和(5.64±0.90) fm；相应的外层中子处于势阱外概率为19.9%、53.6%和66.8%。结果发现，^{12}B第二、三激发态为晕核态，这是在β稳定线附近找到第二个核的新晕核态。

同时，团队基于改进的单粒子势模型，系统研究了晕存在的条件。单粒子势模型源自Hansen和Jonson描述晕核的核芯+价粒子图像。该单粒子势模型仅对中子晕结构作了描述，而且使用的是方势阱，这和实际情况有区别。因此，使用更符合实际情况的Woods-Saxon势对单粒子势模型进行了改进，并引入了库仑势和自旋-轨道耦合势形式，以进一步考察质子晕存在的条件。基于改进的单粒子势模型，计算了质子滴线核^{8}B和^{17}F不同轨道的价质子RMS半径随束缚能变化的情况。结果如图6所示。可以明显看出，计算点分布在三条线上，说明不同l值的RMS半径变化有着各自的规律。对于l=2的态，由于仅有三个点，难以得出可靠的拟合结果(如图中虚线所示)，而且在d态形成晕的可能性极小。注意到，由于库仑势垒的存在，一些能量大于零，但低于库仑位垒高度V_B的共振态，有一定的存活寿命，因此，有可能成为质子晕的共振核态。因此，对质子晕来说，实际形成晕结构的必要条件是：$-0.511/R_{cn}<E_p<V_B$，其中，R_{cn}是相互作用势半径，E_p是价质子的能量，V_B是库仑势垒的高度。这项工作首次给出质子晕形成的必要条件，并指出质子晕可能存在的区域；这些对寻找新的晕、皮核态有现实的指导意义。

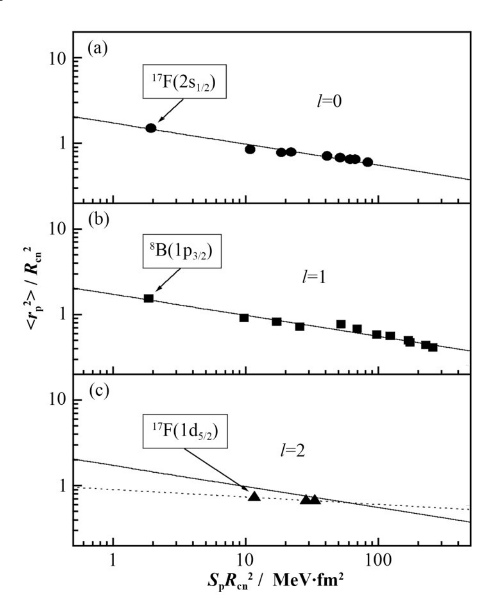


图6 ^{17}F的l=0 (a)、^{8}B的l=1 (b)和^{17}F的l=2 (c)轨道的核外价质子分布的均方根半径随分离能的变化[19]

Fig.6 RMS radii of valence protons varying with the separation energies for a number of states in light proton-rich nuclei: the solid circles, squares, and triangles represent the results of the l = 0, 1, and 2 states, respectively[19]

2.3 双质子奇异发射机制研究

双质子发射是近质子滴线核特有的一种奇特衰变模式，与核子的对关联以及核天体(2p,γ)过程等问题相关，是目前近质子滴线核区的研究前沿之一。

chinaXiv:202309.00041v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202309.00041v1

高激发态的双质子发射能够提供核子在核内的组态和构形等信息，对于探索奇特核结构、核子关联和量子多体理论等具有重要的科学意义。

我们基于中国科学院近代物理研究所的放射性核束装置(Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou，RIBLL)产生的^{28,29}S和^{27,28}P等丰质子核，通过库仑激发布居到高激发态，系统研究了双质子发射的机制和内在关联[20–22]。实验设置方面，利用硅条探测器组成阵列，建立了运动学完全测量的方法；数据分析方面，采用相对论运动学重构的方法，得到了衰变末态三体的不变质量、两个质子的相对张角、相对动量和相对能量等。建立了包含三种发射机制(三体无关联发射、两体级联发射和双质子关联发射)的蒙特卡罗方法分析数据，在^{28,29}S的高激发态上观测到双质子关联(即^{2}He集团)发射的事例[20]，其中，^{29}S是国际上观察到的第二例激发态^{2}He发射，如图7所示。对比^{28,29}S和^{27,28}P的情况，发现双质子晕结构是双质子关联发射的主要成因，而非此前认为的高形变轨道所致[21]。

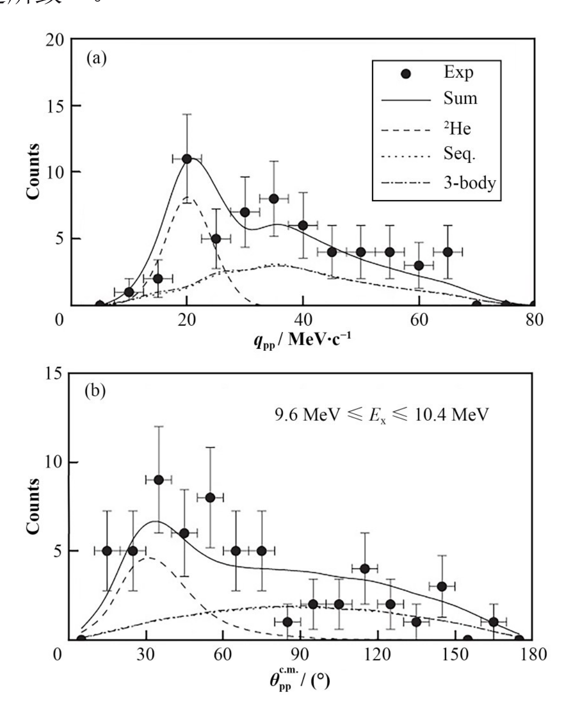


图7 ^{29}S在激发能9.6~10.4 MeV范围内的双质子动量关联(a)和张角分布(b)[20]
曲线表示基于不同衰变模式的模拟结果

Fig.7 Relative momentum (a) and opening angle (b) of two protons of ^{29}S for the excited states at 9.6~10.4 MeV[20]: the curves denote the simulation results with different two-proton decay modes

2.4 质子滴线核衰变谱学研究

远离β稳定线的原子核具有很大的衰变能，在β衰变之后通常布居在子核的高激发态上，可通过发射多个核子或者核子集团以及裂变等再次衰变，如：βn、βp、β2n、β2p、βα等。这些奇异衰变是滴线区核结构的灵敏探针，能够获得有效相互作用(如对关联、三体力、同位旋不对称性等)和基本对称性的知识。在前期开展高激发态双质子发射的基础上，团队将研究重点转向滴线区原子核基态的奇异衰变，系统地开展了sd壳层极丰质子核衰变谱学的研究。

实验基于RIBLL1上开展。针对次级束强度弱的问题，为提高束流的利用效率，获得较高的数据统计，团队先后研制了三套以硅条探测器为核心的阻停-衰变探测器阵列，对质子和双质子的探测效率分别大于50%和15%，能量分辨好于50 keV，探测阈值低于150 keV；同时发展了连续束注入模式的测量方法，实现了百万分之一概率衰变事件的鉴别能力[23]。以此为基础，精细测量了^{20,21}Mg、^{22,23}Al、^{22,23,24,25}Si、^{26,27}P、^{27,28,29}S和^{36,37}Ca等原子核的衰变性质[24]，高精度地获得了它们的质量、半衰期、衰变分支比等数据，发现了多个βp和β2p的奇异衰变。

^{22}Si的中子数N=8，具有Borromean结构，是轻核区唯一一个T_z=−3的核。此前法国大型重离子加速器(Grand Accélérateur National d'Ions Lourds，GANIL)仅观察到一个βp衰变。我们基于高效率的探测手段，在^{22}Si的衰变质子能谱中观察到9个峰，通过位置-能量关联确定了5 700 keV峰是β2p衰变；并利用同位旋相似态(Isobaric Analog State，IAS)的库仑置换能关系导出了^{22}Si的质量，其2p分离能为−108(125) keV，表明其可能存在基态的2p发射[25]。进一步，通过p-γ符合确定了三个βp衰变，并构建了衰变纲图，如图8所示。与镜像核^{22}O的β衰变比较，发现衰变到第一个1$^+$态存在一个极大的同位旋不对称性，δ≈209%(δ是β$^+$与β$^-$衰变概率的百分差)。用包含同位旋不守恒力的壳模型计算可以重现实验结果，指出这个大的不对称性来源于^{22}Al s1/2轨道的晕结构[26]。该结果为实验寻找晕结构提供了新方法，同时为探索同位旋破缺的起源提供了新思路。

在^{27}S的衰变中观察到了13个质子峰，与γ符合后确定了它们的能级和分支比等，构建了衰变纲图，如图9所示，其中带*号的是新观察到的。实验首次同时测量了低激发态的βp和βγ衰变，获得了核天体物理感兴趣的^{25}Al(p,γ)^{26}Si热核反应率[27]，结合^{27}S中得到的^{26}Si(p,γ)^{27}P研究了银河系中^{26}Al的超丰问题。能量较低的6个峰(p_1–p_6)是β2p衰变，通过角关联分析确定了级联双质子发射的机制。在子核^{26}Si的IAS态(E_x=13 055 keV，T=2)附近发现了11 912 keV和13 380 keV两个态，其中13 380 keV(T=1)态和IAS态为同位旋混合的双重态，其混合矩

ChinaXiv合作期刊

阵元 v=130(21) keV，能级差 ΔE=325(13) keV，是迄今为止发现的最强的同位旋混合[28]。同位旋混合态牵涉到费米跃迁和Gamow-Teller(GT)跃迁两种过程，其中费米跃迁与卡比博-小林-益川矩阵(Cabibbo-Kobayashi-Maskawa，CKM)矩阵的幺正性相关，Gamow-Teller(GT)跃迁牵涉到同位旋对称性的破缺。研究 ^{26}Si 中这个极强同位旋混合态出现的原因，将极大推进对上述两个重要问题的理解。

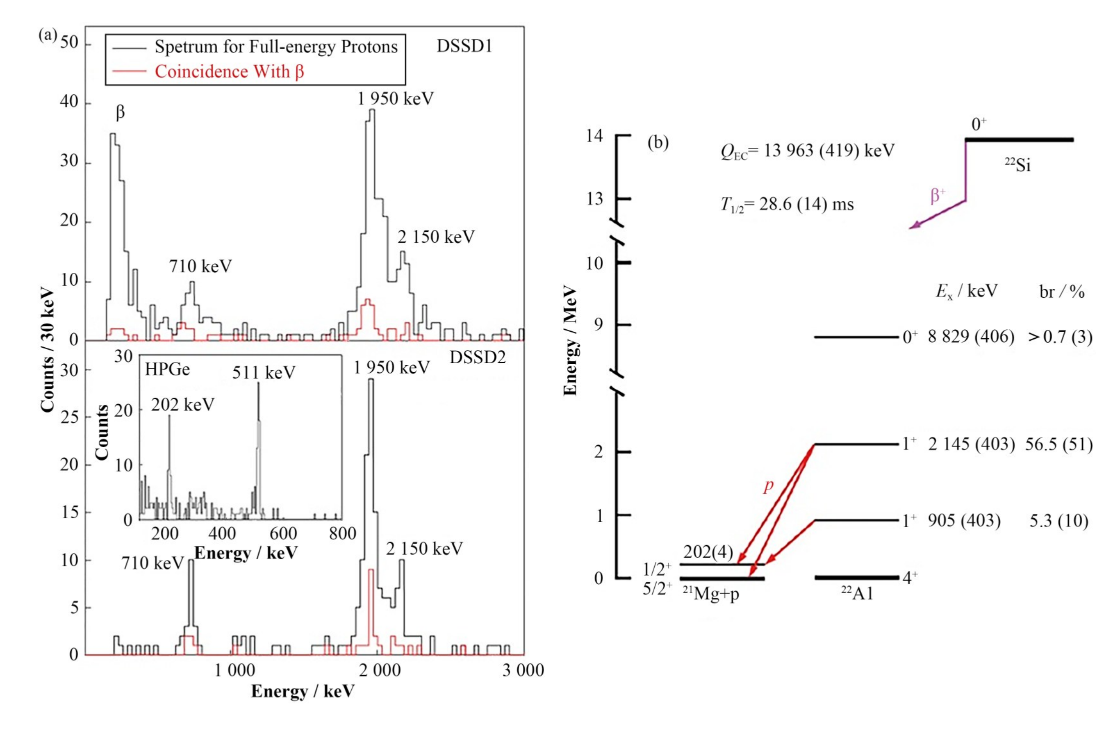


图8 ^{22}Si的βp能谱(a)和衰变纲图(b)[26]
Fig.8 βp energy spectra (a) and decay scheme (b) of ^{22}Si[26]

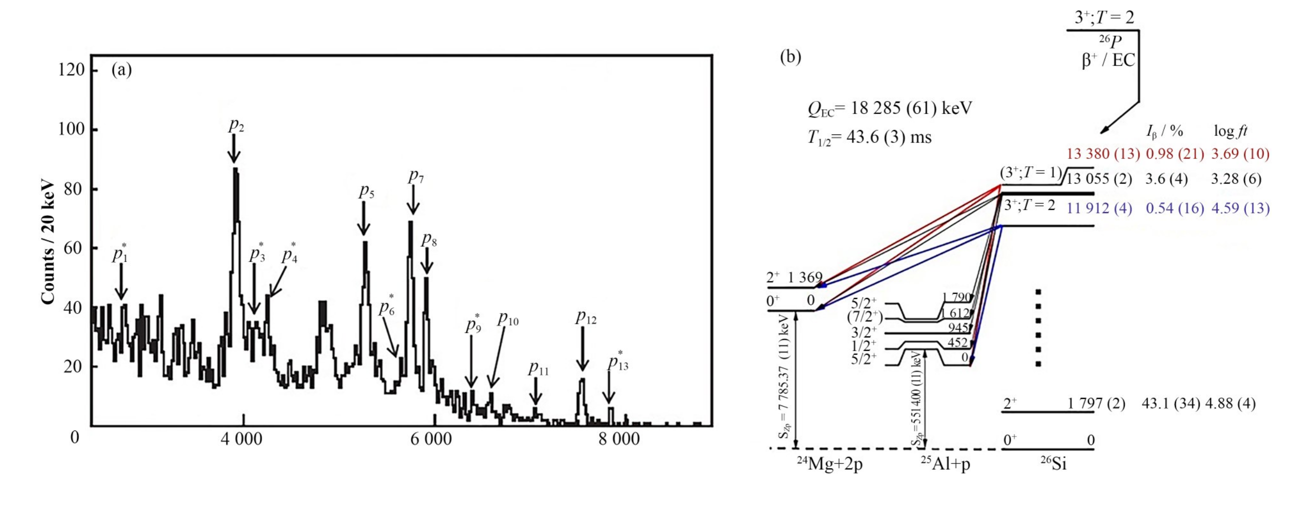


图9 ^{26}P的β延迟衰变的质子能谱(a)和衰变纲图(b)[28]
Fig.9 β delayed proton decay energy spectra (a) and decay scheme (b) of ^{26}P[28]

3 弱束缚核反应机制

3.1 光学势的能量相依性研究

核-核相互作用势是研究核反应机制过程中首先需要确定的最基本的物理量。由于核-核相互作用势与核结构紧密相关，晕核体系的光学势通常会表现出与紧束缚核体系不同的性质，特别是其在深垒能区的变化趋势，是一个亟待解决的关键问题。由于受到放射性核束品质的限制，使得难以直接从弹性散射角分布中抽取晕核体系的光学势参数。因此，团队提出了利用转移反应研究奇特核体系光学势性质的原创性方法。该方法利用稳定核束的转移

chinaXiv:202309.00041v1

ChinaXiv合作期刊

反应作为探针，通过拟合转移反应角分布，从而抽取出射道体系的光学势参数[29]。这种方法具有如下的优点：1)可以利用现有的高品质稳定束流开展实验，从而达到相对较高的精度，如统计、能量和角度精度等；2)通过转移反应可以布局到末态不同的激发态，这非常有利于进行势参数能量相依性的研究，并可针对某一核态进行专门的研究。基于该方法，我们在北京HI-13串列加速器上进行了多个体系的转移反应测量，以研究出射道奇特核体系光学势性质[30−35]。特别是通过单质子转移反应^{208}Pb(^{7}Li,^{6}He)^{209}Bi首次确定了中子晕核^{6}He+^{209}Bi体系的反应阈值，完整揭示出反常"阈异常"的现象，并且发现色散关系无法描述光学势虚部和实部之间的关联[34]，如图10所示。色散关系是由因果律推导得到，因此，色散关系不适用是非常反常的现象，其深层的物理原因亟待进一步探索。

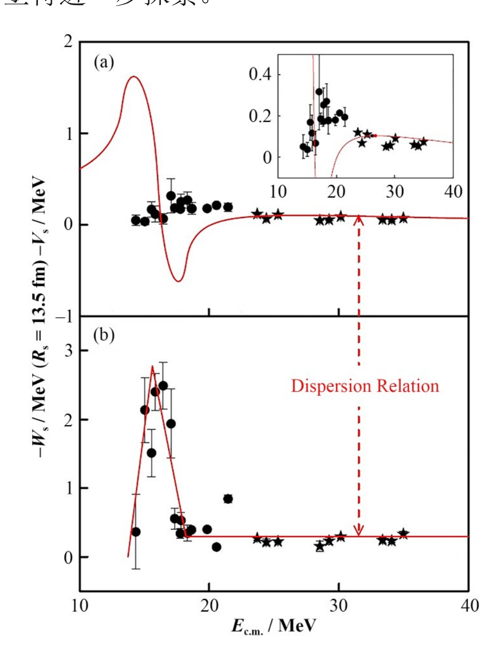


图10 ^{6}He+^{209}Bi体系光学势实部(a)和虚部(b)深度随能量变化的情况[34]

(a)中实线为分段线性拟合结果；(b)中实线为色散关系计算结果

Fig.10 Energy dependence of the real (a) and imaginary (b) potentials at a sensitivity radius of 13.5 fm for the ^{6}He+^{209}Bi system: the solid curve in (b) shows the linear segment fitting for the imaginary potential, and the prediction of the dispersion relation according to the variation of the imaginary potential is represented in (a) by the solid curve[34]

另一方面，我们尝试将贝叶斯方法应用于抽取奇特核体系的光学势[36]。首先考察了先验分布对贝叶斯分析结果的影响。针对^{6}Li+^{209}Bi弹性散射数据，我们采用了文献中已经报道的两种虚部深度变化趋势作为先验分布，同时采用一定区间内的均匀分布的先验分布作为比较。结果表明，贝叶斯分析的结论强烈依赖于所采用的先验分布。这说明，由于唯像光学模型的模糊性，弹性散射数据不能够对光学势参数的后验分布产生足够的约束。在这种情况下，均匀分布或者无偏的频率方法得到的结论可以作为先验分布对弹散数据进行贝叶斯分析。该工作为将贝叶斯方法进一步应用于奇特核体系的光学势分析打下了基础。

3.2 质子滴线核的反应机制研究

近年来，随着放射性束流强度和品质的提升以及探测手段的升级，奇特核引起的在库仑势垒能区的核反应机制研究是当前核物理领域的热点问题。对于弱束缚核，由于结合能较低，在反应时容易发生破裂。破裂反应道会对弹散和熔合等反应道产生耦合效应，从而影响整个体系的反应动力学过程。对于丰质子核区，目前只有极少量的实验研究结果，因此，丰质子核在近垒能区的反应机制是亟待探索的空白区域。当前，研究主要集中在^{8}B和^{17}F两个核。^{8}B作为质子晕核，其质子分离能只有138 keV。^{17}F为质子滴线核，质子破裂阈为600 keV，其第一激发态被认为具有质子晕结构。我们基于日本东京大学原子核研究中心的(Center for Nuclear Study Radioactive Ion Beam separator，CRIB)终端，对这两个质子滴线核分别开展了完全运动学测量[37]。

对^{17}F+^{58}Ni体系在近垒能区4个能点(43.6 MeV、47.5 MeV、55.7 MeV和63.1 MeV)开展了测量[38]。为了实现对低能重反应产物的鉴别，设计了基于电离室的多层望远镜阵列(Multilayer Ionization-chamber Telescope Array，MITA)[39]。该阵列由10组四重望远镜构成，立体角覆盖约为8% 4π。基于MITA强大的粒子鉴别能力，首次实现了^{17}F轻靶核体系在近垒能区反应产物的完全鉴别，从而提取了准弹性散射角分布、破裂反应角分布以及总熔合反应激发函数等近全反应道数据。各反应道的激发函数如图11所示。结果表明：在垒上能区，熔合反应是主要的反应过程；随着能量降低，熔合截面呈指数下降，在近垒和垒下能区，破裂/转移等直接反应过程占主导；同时，相比于^{16}O+^{58}Ni体系，^{17}F+^{58}Ni在垒下能区表现出总熔合反应截面增强的现象。利用不同的反应理论模型对各反应道进行了细致计算，结果表明：去弹性破裂是产生^{16}O的主要机制；垒下熔合截面的增强主要是由于连续态的强耦合效应所导致。该结果首次尝试从全反应道角度理解奇特核复杂的反应机制，并为推动相关核反应理论模型的发展提供了关键的实验数据。

对质子晕核^{8}B+^{120}Sn体系，在近垒开展了38.7 MeV和46.1 MeV两个能点的测量[40]。该体系

chinaXiv:202309.00041v1

ChinaXiv合作期刊

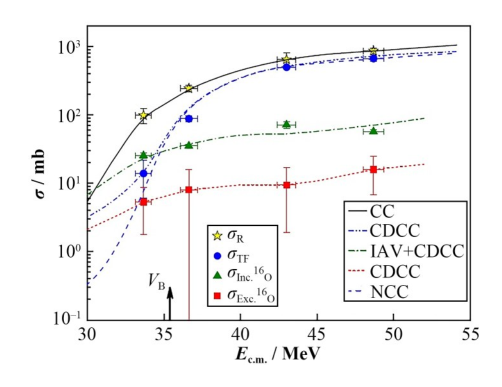


图11 $^{6}He+^{209}Bi$体系光学势实部(a)和虚部(b)深度随能量变化的情况[38]
(a)中实线为分段线性拟合结果;(b)中实线为色散关系计算结果。$^{17}F+^{58}Ni$体系的总反应截面(星形)、总熔合反应(圆形)、单举破裂(三角形)和关联破裂(正方形)激发函数。曲线为相应核反应理论模型的计算结果。箭头标明库仑势垒的位置,约为35.4 MeV

Fig.11 Excitation functions of total reaction (stars) and exclusive (squares) and inclusive (triangles) breakups, as well as the total fusion (circles), of $^{17}F+^{58}Ni$: the curves denote the theoretical results for corresponding reaction channels, and the arrow indicates the nominal position of the Coulomb barrier, which is approximately 35.4 MeV[38]

反应产物相对较轻,使用硅探测器组成的望远镜即可实现产物的鉴别。为了进一步提高探测效率,从而实现破裂产物的符合测量,设计了由10组硅望远镜组成的探测器阵列(Silicon Telescope Array for Reactions induced by Exotic nuclei,STARE)[41]。该阵列结构紧凑,立体角覆盖达到了40% 4π。基于此阵列,首次实现了质子晕核^{8}B破裂碎片的关联测量。破裂反应角分布表明,弹性破裂是产生^{7}Be的主要机制,给出了破裂是主要直接反应过程的确切证据。同时,通过破裂碎片的能量关联和角度关联(图12),重构了完整的破裂过程。数据分析方面,基于三体的连续态离散化耦合道计算(Continuum-Discretized Coupled Channels,CDCC)结合马尔科夫链蒙特卡罗方法,实现了破裂及连续态耦合效应的微观描述。结果表明:^{8}B通过1^{+}共振态破裂只占总破裂截面的4%;^{8}B的破裂是以出射道的瞬时破裂为主。

4 总结与展望

近40年来,原子能院核反应团队在重离子熔合-裂变机制、垒下熔合增强机制、奇特核反应机制、奇异结构和奇异衰变方面取得了多项原创性成果。将来,除了继续深入现有的研究内容外,还要继续开拓新的研究方向。例如,基于正在建设的重离子飞行时间谱仪(Heavy-ion Time of Flight,HiTOF)开展多核子转移反应机制研究,为合成超重元素提供新思路和新途径;另一方面,依托新近建成的北京放射性束流装置(Beijing Radioactive Ion beam Facility,BRIF),开展不稳定核的反应机制和奇异结构研究。

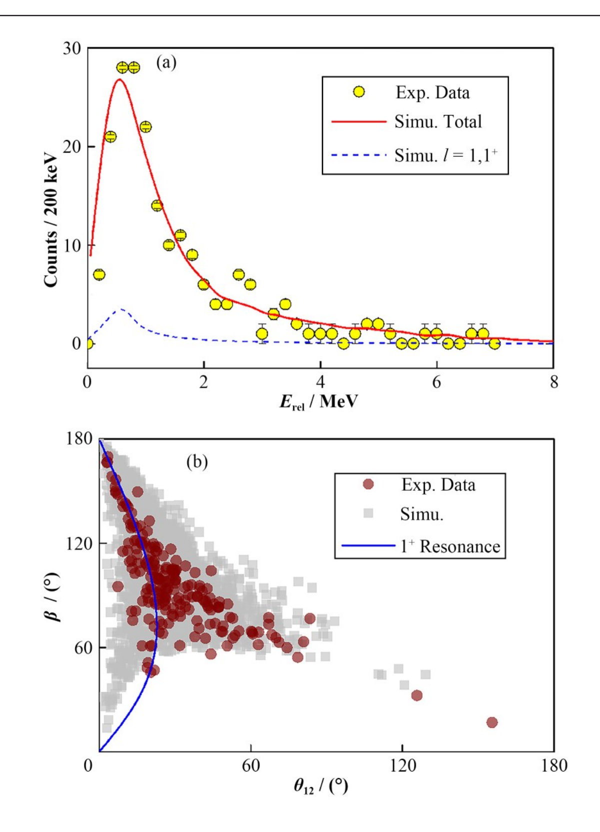


图12 $^{8}B+^{120}Sn$体系在38.7 MeV入射能量下由破裂碎片关联信息重构的相对动能谱(a)和角关联谱(b)[37]
圆圈为实验结果,(a)中实线和虚线分别为CDCC和1^{+}共振态的模拟结果,(b)中正方形为模拟结果,实线为1^{+}共振态成分的计算结果

Fig.12 Measured relative energy (E_{rel}) distribution (a) and angular correlation (b) for breakup fragments ^{7}Be and p from the $^{8}B+^{120}Sn$ system at 38.7 MeV: circles denote the experimental data, the solid and dashed curves in panel (a) represent the simulated distributions of E_{rel} and the contribution of the p-wave 1^{+} state; the squares in panel (b) show the simulation results, and the solid curve denotes the expected β-θ_{12} correlation assuming asymptotic breakup from the 1^{+} resonance of ^{8}B[37]

作者贡献声明 杨磊负责数据收集和文章撰写;林承键、贾会明、马南茹和温培威提供了相关数据和结果图;杨峰和张焕乔对文章成文提供了指导。所有作者对文章进行了审阅和修改。

参考文献

1 Vandenbosch R, Murakami T, Sahm C, *et al.* Anomalously broad spin distributions in sub-barrier fusion reactions[J]. Physical Review Letters, 1986, **56**(12): 1234–1236. DOI: 10.1103/PhysRevLett.56.1234.

2 Zhang H Q, Liu Z H, Xu J C, *et al.* Anomalous anisotropy of fission fragments in near- and sub-barrier complete fusion-fission reactions of $^{16}O+^{232}Th$, $^{19}F+^{232}Th$,

chinaXiv:202309.00041v1

ChinaXiv合作期刊

and $^{16}O+^{238}U$[J]. Physical Review C, Nuclear Physics, 1994, **49**(2): 926 – 931. DOI: 10.1103/physrevc.49.926.

3 Liu Z H, Zhang H Q, Xu J C, *et al*. Preequilibrium fission for low angular momentum[J]. Physics Letters B, 1995, **353**(2 – 3): 173 – 178. DOI: 10.1016/0370-2693(95)00461-s.

4 Zhang H Q, Liu Z H, Xu J C, *et al*. Experimental evidence against a model incorporating fission before K equilibration[J]. Physical Review C, Nuclear Physics, 1993, **47**(3): 1309 – 1310. DOI: 10.1103/physrevc. 47.1309.

5 Zhang H Q, Xu J C, Liu Z H, *et al*. Anomalous anisotropies of fission fragments for the $^{16}O+^{232}Th$ sub-barrier fusion-fission reaction[J]. Physical Review C, Nuclear Physics, 1990, **42**(3): 1086 – 1091. DOI: 10.1103/physrevc.42.1086.

6 Zhang H Q, Xu J C, Liu Z H, *et al*. Anomalous anisotropies of fission fragment angular distributions in sub-barrier fusion-fission reaction[J]. Physics Letters B, 1989, **218**(2): 133 – 136. DOI: 10.1016/0370-2693(89)91407-X.

7 Kailas S. Heavy-ion induced fission at near-barrier energies[J]. Physics Reports, 1997, **284**(6): 381 – 416. DOI: 10.1016/S0370-1573(96)00044-0.

8 Hinde D J, Dasgupta M, Leigh J R, *et al*. Fusion-fission versus quasifission: effect of nuclear orientation[J]. Physical Review Letters, 1995, **74**(8): 1295 – 1298. DOI: 10.1103/PhysRevLett.74.1295.

9 Back B B, Betts R R, Cassidy K, *et al*. Experimental signatures of quasifission reactions[J]. Physical Review Letters, 1983, **50**(11): 818 – 821. DOI: 10.1103/physrevlett.50.818.

10 Zhang C L, Zhang H Q, Lin C J, *et al*. Competition between fusion-fission and quasifission processes in $^{32}S+^{184}W$ reaction[J]. Nuclear Physics A, 2010, **834**(1 – 4): 201c – 204c. DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2009.12.040.

11 Lin C J, du Rietz R, Hinde D J, *et al*. Systematic behavior of mass distributions in ^{48}Ti-induced fission at near-barrier energies[J]. Physical Review C, 2012, **85**: 014611. DOI: 10.1103/physrevc.85.014611.

12 Jia H M, Lin C J, Yang F, *et al*. Fusion of the $^{16}O+^{76}Ge$ and $^{18}O+^{74}Ge$ systems and the role of positive *Q*-value neutron transfers[J]. Physical Review C, 2012, **86**: 044621. DOI: 10.1103/PhysRevC.86.044621.

13 Jia H M, Lin C J, Yang F, *et al*. Fusion of $^{32}S+^{94}Zr$: further exploration of the effect of the positive Q_{xn} value neutron transfer channels[J]. Physical Review C, 2014, **89**(6): 064605. DOI: 10.1103/physrevc.89.064605.

14 Jia H M, Lin C J, Yang L, *et al*. A self-consistent method to analyze the effects of the positive *Q*-value neutron transfers on fusion[J]. Physics Letters B, 2016, **755**: 43 – 46. DOI: 10.1016/j.physletb.2016.01.058.

15 Ma N R, Lin C J, Jia H M, *et al*. Measurement of (n, f) and (n, *x*n) cross sections with surrogate reaction method [J]. EPJ Web of Conferences, 2020, **239**: 01007. DOI: 10.1051/epjconf/202023901007.

16 Jia H M, Lin C J, Yang F, *et al*. Extracting the hexadecapole deformation from backward quasi-elastic scattering[J]. Physical Review C, 2014, **90**(3): 031601. DOI: 10.1103/physrevc.90.031601.

17 Otsuka T, Fukunishi N, Sagawa H. Structure of exotic neutron-rich nuclei[J]. Physical Review Letters, 1993, **70**(10): 1385 – 1388. DOI: 10.1103/physrevlett.70.1385.

18 Liu Z H, Lin C J, Zhang H Q, *et al*. Asymptotic normalization coefficients and neutron halo of the excited states in ^{12}B and ^{13}C[J]. Physical Review C, 2001, **64**: 034312. DOI: 10.1103/PhysRevC.64.034312.

19 Lin C J, Zhang H Q, Liu Z H, *et al*. Scaling laws of valence nucleon distributions for single-particle states[J]. Physical Review C, 2002, **66**(6): 067302. DOI: 10.1103/physrevc.66.067302.

20 Lin C J, Xu X X, Jia H M, *et al*. Experimental study of two-proton correlated emission from ^{29}S excited states[J]. Physical Review C, 2009, **80**: 014310. DOI: 10.1103/physrevc.80.014310.

21 Xu X X, Lin C J, Jia H M, *et al*. Correlations of two protons emitted from excited states of ^{28}S and ^{27}P[J]. Physics Letters B, 2013, **727**(1 – 3): 126 – 129. DOI: 10.1016/j.physletb.2013.10.029.

22 Xu X X, Lin C J, Jia H M, *et al*. Investigation of two-proton emission from excited states of the odd-*Z* nucleus ^{28}P by complete-kinematics measurements[J]. Physical Review C, 2010, **81**(5): 054317. DOI: 10.1103/physrevc.81.054317.

23 Sun L J, Xu X X, Lin C J, *et al*. A detection system for charged-particle decay studies with a continuous-implantation method[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2015, **804**: 1 – 7. DOI: 10.1016/j.nima.2015.09.039.

24 林承键, 徐新星, 孙立杰, 等. 基于HIRFL-RIBLL1装置开展的极丰质子核衰变研究进展[J]. 科学通报, 2021, **66**

chinaXiv:202309.00041v1

ChinaXiv合作期刊

(27): 3527 - 3536. DOI: 10.1360/TB-2020-1679.

LIN Chengjian, XU Xinxing, SUN Lijie, *et al*. Progress on decays of extremely proton-rich nuclei based on the HIRFL-RIBLL1 facility[J]. Chinese Science Bulletin, 2021, **66**(27): 3527 - 3536. DOI: 10.1360/TB-2020-1679.

25 Xu X X, Lin C J, Sun L J, *et al*. Observation of β-delayed two-proton emission in the decay of ^{22}Si[J]. Physics Letters B, 2017, **766**: 312 - 316. DOI: 10.1016/j.physletb.2017.01.028.

26 Lee J, Xu X X, Kaneko K, *et al*. Large isospin asymmetry in ^{22}Si/^{22}O mirror gamow-teller transitions reveals the halo structure of ^{22}Al[J]. Physical Review Letters, 2020, **125**(19): 192503. DOI: 10.1103/physrevlett.125.192503.

27 Liang P F, Sun L J, Lee J, *et al*. Simultaneous measurement of β-delayed proton and γ emission of ^{26}P for the ^{25}Al(p, γ) ^{26}Si reaction rate[J]. Physical Review C, 2020, **101**: 024305. DOI: 10.1103/PhysRevC.101.024305.

28 Liu J J, Xu X X, Sun L J, *et al*. Observation of a strongly isospin-mixed doublet in ^{26}Si via β-delayed two-proton decay of ^{26}P[J]. Physical Review Letters, 2022, **129**: 242502. DOI: 10.1103/PhysRevLett.129.242502.

29 Lin C J. Optical potentials of exotic nuclear systems extracted from transfer reactions[C]//AIP Conference Proceedings. San Servolo, Venezia (Italy). AIP, 2006, **853**: 81. DOI: 10.1063/1.2338359.

30 An G P, Lin C J, Zhang H Q, *et al*. Optical potential parameters of weakly bound nuclear System ^{17}F+^{13}C[J]. Chinese Physics Letters, 2008, **25**(12): 4237 - 4239. DOI: 10.1088/0256-307x/25/12/014.

31 Wu Z D, Lin C J, Zhang H Q, *et al*. Optical potential parameters for halo nucleus system ^{6}He+^{12}C from transfer reaction ^{11}B(^{7}Li,^{6}He)^{12}C[J]. Chinese Physics Letters, 2009, **26**(2): 022503. DOI: 10.1088/0256-307x/26/2/022503.

32 Yang L, Lin C J, Jia H M, *et al*. Optical model potentials for the ^{6}He+^{209}Bi reaction from a ^{208}Pb(^{7}Li, ^{6}He)^{209}Bi reaction analysis[J]. Physical Review C, 2014, **89**: 044615. DOI: 10.1103/PhysRevC.89.044615.

33 Yang L, Lin C J, Jia H M, *et al*. Optical model potentials for ^{6}He+^{64}Zn from ^{63}Cu(^{7}Li,^{6}He)^{64}Zn reactions[J]. Physical Review C, 2017, **95**: 034616. DOI: 10.1103/PhysRevC.95.034616.

34 Yang L, Lin C J, Jia H M, *et al*. Is the dispersion relation applicable for exotic nuclear systems? the abnormal threshold anomaly in the ^{6}He+^{209}Bi system[J]. Physical Review Letters, 2017, **119**(4): 042503. DOI: 10.1103/physrevlett.119.042503.

35 Yang L, Lin C J, Jia H M, *et al*. Abnormal behavior of the optical potential for the halo nuclear system ^{6}He+^{209}Bi[J]. Physical Review C, 2017, **96**(4): 044615. DOI: 10.1103/physrevc.96.044615.

36 Yang L, Lin C J, Zhang Y X, *et al*. Bayesian analysis on interactions of exotic nuclear systems[J]. Physics Letters B, 2020, **807**: 135540. DOI: 10.1016/j. physletb. 2020. 135540.

37 Yang L, Lin C J, Ma N R, *et al*. Reaction dynamics of proton drip line nuclei at energies around the Coulomb barrier[J]. Science Bulletin, 2023, **68**(8): 775 - 778. DOI: 10.1016/j.scib.2023.03.026.

38 Yang L, Lin C J, Yamaguchi H, *et al*. Insight into the reaction dynamics of proton drip-line nuclear system ^{17}F+^{58}Ni at near-barrier energies[J]. Physics Letters B, 2021, **813**: 136045. DOI: 10.1016/j.physletb.2020.136045.

39 Ma N R, Yang L, Lin C J, *et al*. MITA: a multilayer ionization-chamber Telescope Array for low-energy reactions with exotic nuclei[J]. The European Physical Journal A, 2019, **55**(6): 87. DOI: 10.1140/epja/i2019-12765-7.

40 Yang L, Lin C J, Yamaguchi H, *et al*. Breakup of the proton halo nucleus ^{8}B near barrier energies[J]. Nature Communications, 2022, **13**: 7193. DOI: 10.1038/s41467-022-34767-8.

41 Yao Y J, Lin C J, Yang L, *et al*. The effects of beam drifts on elastic scattering measured by the large solid-angle covered detector array[J]. Nuclear Science and Techniques, 2021, **32**(2): 14. DOI: 10.1007/s41365-021-00854-6.

chinaXiv:202309.00041v1